

平成21年度卒業論文

放射冷却炉の研究

福岡工業大学 工学部
知能機械工学科

06E2025 坂入 圭也

06E2049 本多 洸次郎

指導教員 河村 良行 教授

目次

第1章 緒言	1
第2章 実験装置	3
2.1 実験装置概要	
2.2 放射冷却炉	
2.3 ZnSe (ジンクセレン)	
2.4 熱電対	
2.5 電離真空計	
2.6 高真空排気装置	
2.7 増幅器	
2.8 D/A 変換器	
2.9 プログラム	
第3章 実験方法	13
3.1 室内実験	
3.2 屋外実験	
3.3 実験手順	
第4章 理論計算の概要	17
4.1 計算方法	
4.1.1 黒体センサーの放射量	
4.1.2 窓材 (ZnSe) について	
4.1.3 窓材の放射	
4.1.4 黒体支持ワイヤーによる加熱量	
4.1.5 空気熱伝導による熱量	
4.1.6 大気からの放射	
4.1.7 アルミ容器からの放射	
4.2 室内実験の理論計算	
4.3 屋外実験の理論計算	
4.4 アルミ容器の放射率の補正	
第5章 測定結果及び考察	27
5.1 測定結果	
5.2 温度の伝わりの遅れ	
5.3 空気の熱伝導による影響	
5.4 放物面鏡の反射による影響	
5.5 大気の放射率について	
5.6 熱容量による放射への影響	
第6章 結言	36
参考文献	38
謝辞	39

第 1 章

緒言

冬の晴れた日の朝に、草や車に霜が降りることがある。この現象は、地面や物にある熱エネルギーが空に向かって放射されることで、空気よりも温度が低下することで起きる。このことを放射冷却という。この現象を利用して、電気を使わず物を冷やす非電化冷蔵庫が発明されている。

この研究の実験装置は放射冷却(熱の放射)を利用するが、非電化冷蔵庫のようにものを冷やすことを目的にするのではなく、熱の放射について定量的な研究を行うことを目的とする。装置内部に温度センサーの役割をする黒体設置放射板を設置する。黒体放射板を夜空にむけると大気から熱が放射される。それから黒体放射板は熱を吸収して、その熱を放射することで黒体放射板が冷える。そのときの測定した電圧を温度に変換して実測値と理論値を比べていく。

第 2 章

実験装置

2.1 実験装置概要

実験装置の概要は図1のようになる。放射冷却炉本体はアルミを加工したものである。本体上部に窓材として、ZnSe(ジンクセレン)を使用する。ZnSeを通った熱を反射させ、黒体放射板に熱を伝えるため、内部は金メッキにしてある。空気による熱伝導を避けるため、本体内部を真空状態にさせる高真空排気装置を取り付ける。高真空排気装置により、放射冷却炉本体内部の圧力は 4.2×10^{-3} [Pa] である。

黒体は銅板(直径5[mm]、厚さ0.08[mm])に黒く塗装したものである。黒体放射板はナイロンのワイヤー(直径30[μ m])で支えている。黒体放射板と氷の温度差により電圧が発生するように熱電対線タイプK(アルメル、クロメル)を配線している。直径は50[μ m]である。熱電対から発生する電圧は小さいため、増幅器で電圧を増幅させる。また電圧の波形を測定するためオシロスコープを使用する。測定された電圧をD/A変換器を通してPC上に記録する。

①は黒体から放射される熱エネルギーであり、放物面鏡に反射して放出する。②はZnSeから放出させる熱エネルギーである。③は大気から放射される熱エネルギーであり、ZnSeの透過率分、黒体放射板に伝わる。宇宙の温度は3[K]であり、低いため地上に対し放出している熱エネルギーは少ないので③にはほとんど含まれない。①は②と③の合計と釣り合うとしている。

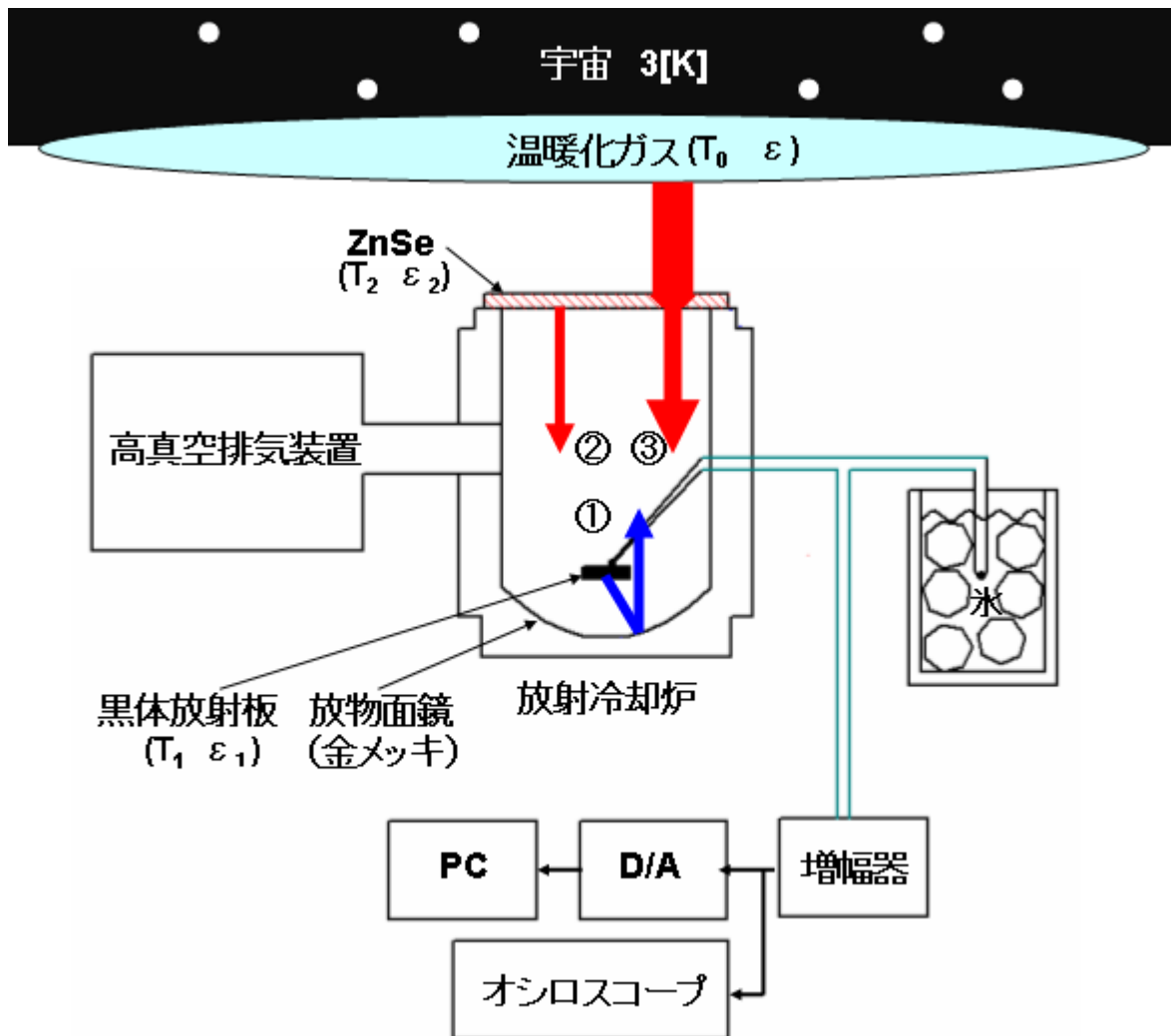


図1. 放射冷却炉実験システム

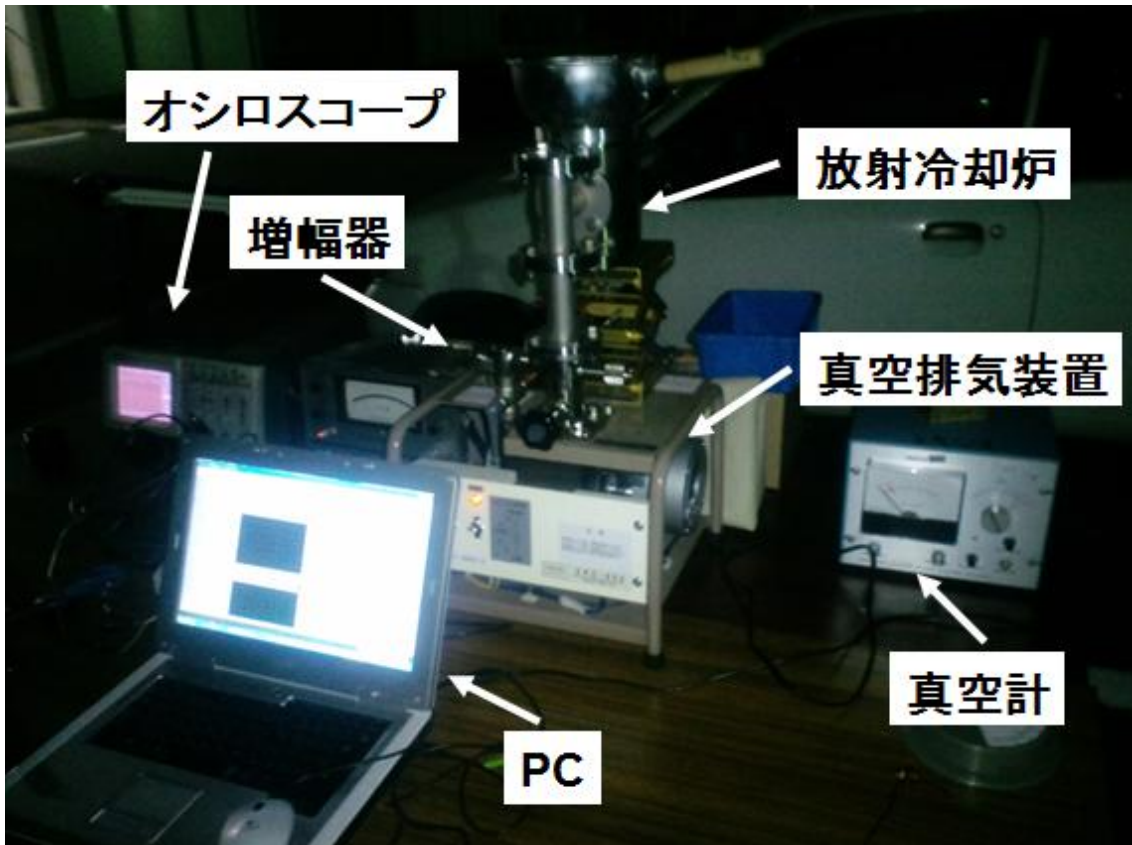


図 2. 放射冷却炉実験装置

2.2 放射冷却炉

放射冷却炉は加工、研磨作業の都合により、図3のように ZnSe を抑える①、熱電対や高真空排気装置を取り付けるための穴があけられている②、凹面鏡のようになっている③と3つに分かれている。図4は①と ZnSe をはずし、放射冷却炉を上から撮ったものである。黒体放射板は図5のように、ワイヤー（ナイロン）2本の交点に取り付けている。ただし図5の写真は②を逆にしたものである。放射冷却炉の③は図6のようになっている。②と③は、熱のエネルギーを反射させるために内側は研磨されており、その表面に金メッキが施されている。放射冷却炉の②と③、②と ZnSe の間には、真空状態を保つためオイルシールを取り付けている。

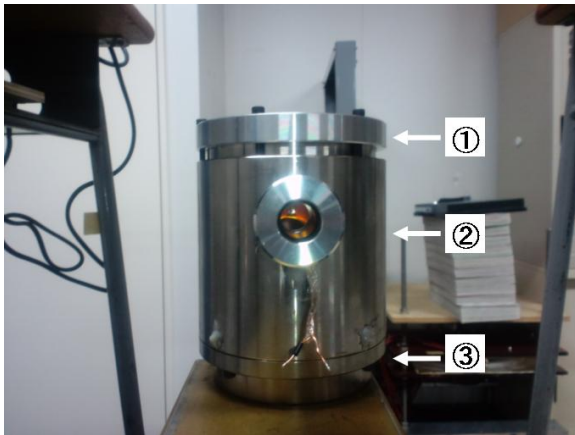


図3. 放射冷却炉

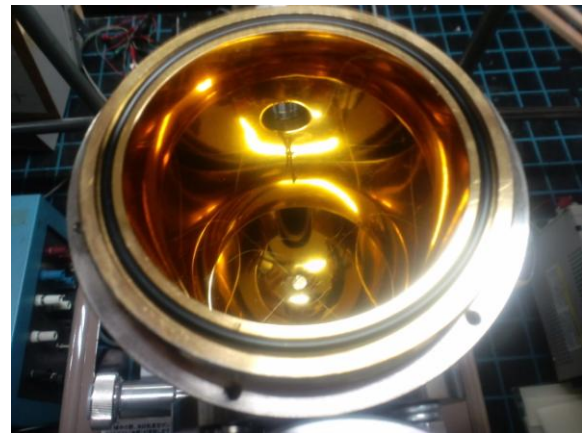


図4. 放射冷却炉中身

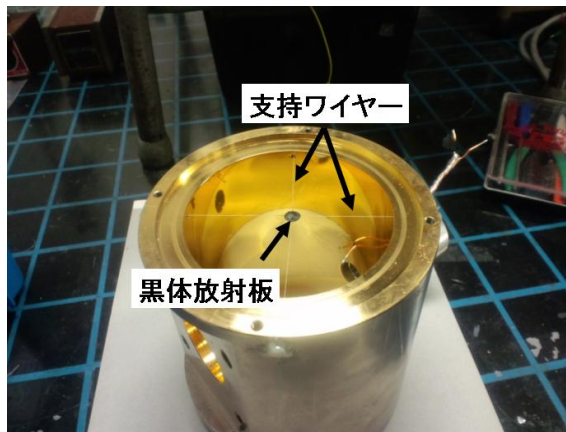


図5. 放射冷却炉②



図6. 放射冷却炉③

2.3 ZnSe(ジンクセレン)

外部から黒体に放射される熱エネルギーを通す窓材として古河電子株式会社で購入した ZnSe を使用する。図7は ZnSe を放射冷却炉本体に設置したものである。各波長における透過率はエレクトロニクス研究所にあるフーリエ赤外分光器で調べた。ガラスなどの窓材よりも透過率は高く、波長の範囲が広い。古河電子株式会社から送られてきた透過率のグラフは付録に記載する。

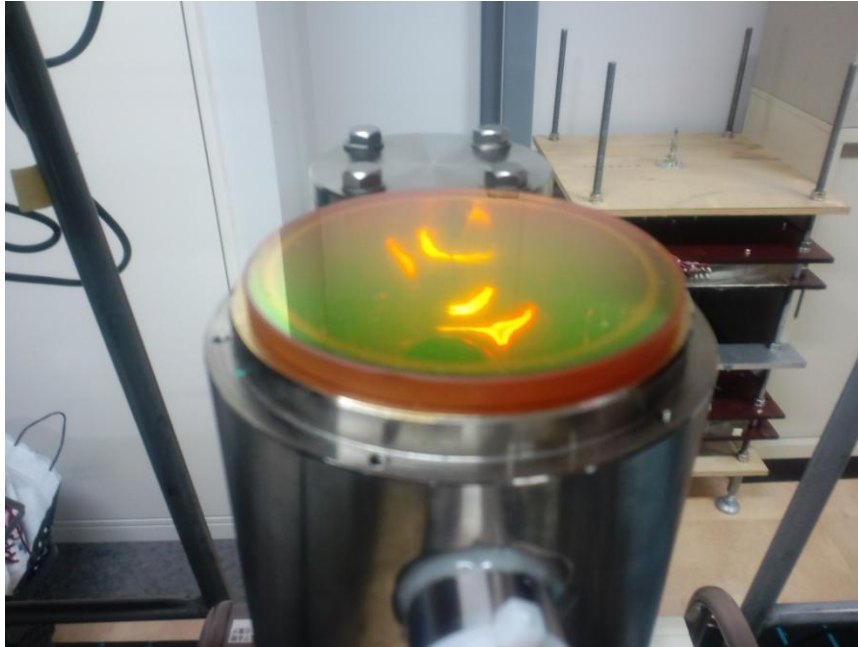


図7. ZnSe

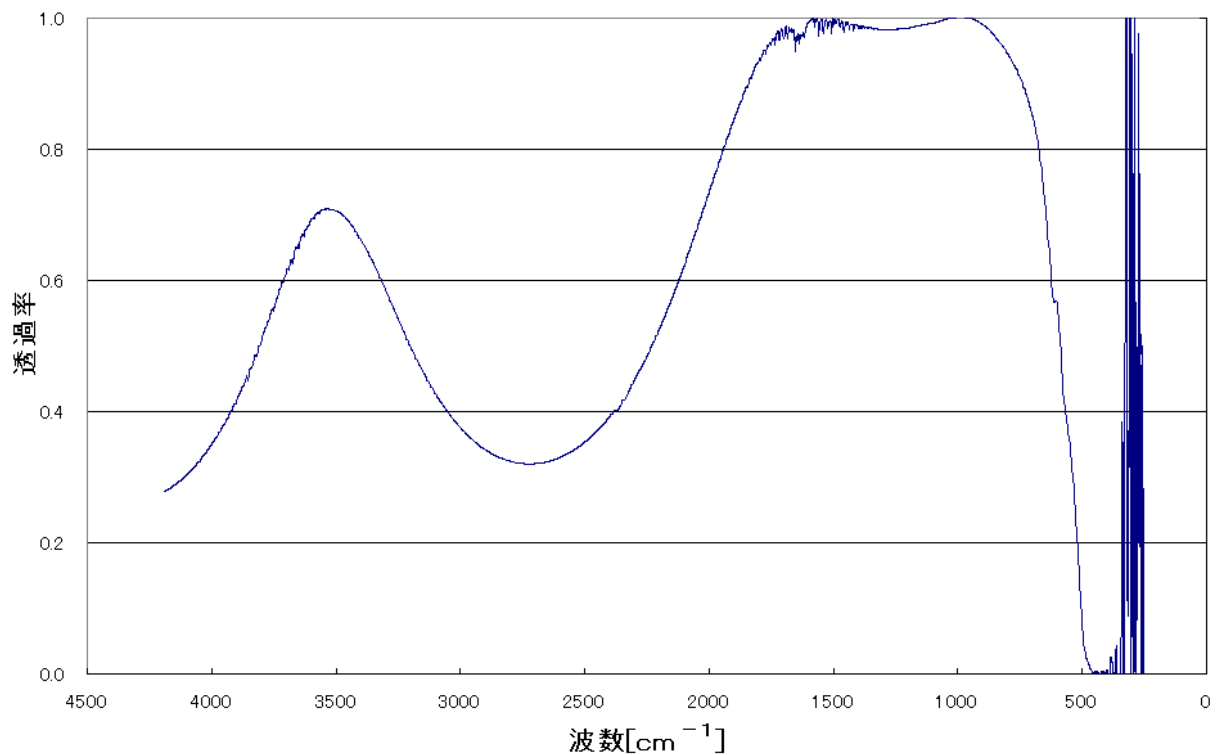


図8. ZnSe 透過率

2.4 熱電対

熱電対は異なる金属の線を繋ぐことで、2つの接点部分の温度差により電圧が生じる現象を利用したものである。実験装置には石川産業株式会社で購入したタイプ K (アルメル、クロメル) を使用している。本実験では熱電対は2本用意した。一本の熱電対は氷がある容器(0°C)に入れて、もう一つの熱電対は黒体放射板に繋げる。熱電対線は非常に細いため、銅線を繋げて配線しやすいようにしている。配線は図9のようになり、実験では2.7で説明する増幅器を銅線に繋げる。

+極アルメルに繋がっている銅線には黒シールをつけている。図10、図11のように緑のクリップでお互いを繋げている。増幅器 INPUT のクリップの+極は氷、-極は黒体放射板からの銅線に繋げることで、黒体放射板の温度変化によって生じる電圧を増幅できる。

電圧、温度の関係は JIS 規格 (JIS C 1602) の熱起電力表より定められている。この実験では黒体放射板は高温にならないので、表の温度範囲は-100°C~100°Cとした。この電圧と温度の関係から多項式を求める。この多項式より記録した電圧の値から温度を求める。

$$Y = -4.7 \times 10^{-7} x^2 + 0.02601056 x \quad (2.1)$$

Y : 温度[°C] x : 電圧[μV]

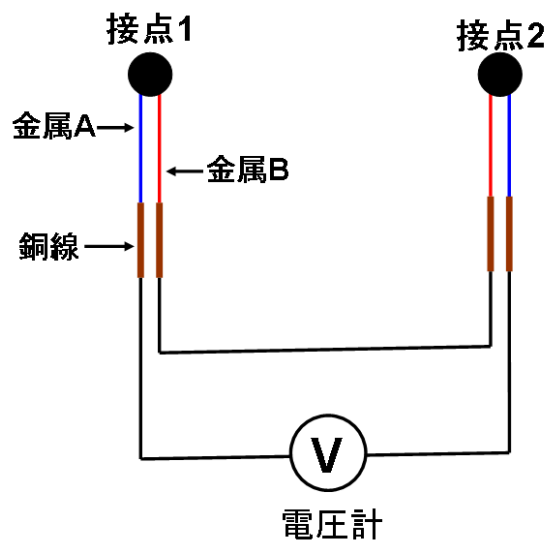


図9. 熱電対



図10. 黒体放射からの銅線



図11. 氷からの銅線

2.5 電離真空計

放射冷却路本体内部の真空度は、電離真空計で測定している。電離真空計のゲージと表示器は測定ケーブルで繋げている。ゲージ内部には電子を放出するフィラメント、電子を捕集するグリッド、イオンを捕集するコレクタがある。ゲージ内部の気体分子の電子を放出させ、生成したイオンの数から装置内部の圧力を測定する。放射冷却炉内部を高真空にすることで、空気による熱伝導の影響が少なくなる。そのため実験では放射冷却炉の真空度を調べる必要がある。実験では真空度が 4.2×10^{-3} [Pa] まで測定できた。

ゲージには F、G、P の記号がついている。表示器に測定ケーブルを繋げ、測定ケーブルのクリップをゲージの端子に繋ぐ。F、G は同じ記号同士だが、測定ケーブルの記号 I は P の端子に繋げる。

POWER のスイッチを押すと表示器の電源が入る。ZERO ADJ. のつまみを回すことで零点調整ができる。次に FILAMENT のボタンを押し、TORR のつまみを回すと測定する範囲を調整できる。

ただし、ゲージ内部が大気の状態で測定するとフィラメントが焼ききれる可能性があるため注意が必要である。また表示器の針が不安定なブレを起こすときは、高真空排気装置の油拡散ポンプに油回転真空ポンプのオイルが混じった可能性があるため、油拡散ポンプを点検する必要がある。



図 12. 電離真空計(ゲージ)



図 13. 電離真空計(表示器)

2.6 高真空排気装置

放射冷却炉本体を真空状態にするために高真空排気装置(図 14)を使用している。高真空排気装置は図 15 のように油回転真空ポンプ、油拡散ポンプの2つが設置されている。製品はアルバック機工株式会社のものである。

動作を開始させるときは、はじめにメインバルブ、LEAK.V が閉まっているか確認する。確認したら R.P スイッチを ON にして、油回転真空ポンプを起動する。三方向バルブを上に向けて放射冷却炉の中を粗引きする。粗引きを1分程行ったら、三方向バルブを下方向に回す。D.P スイッチを ON にして油拡散ポンプを起動する。15分ほど経過したらメインバルブを開ける。数十分すれば放射冷却炉の中は高真空状態になる。

動作を停止させるときは、メインバルブを閉め、D.P スイッチを OFF にする。油拡散ポンプが冷えるまで待つ。冷えたら三方向バルブを水平して、LEAK.V①を緩め空気を入れる。空気を入れたら LEAK.V①を閉めて、R.P のスイッチを OFF にする。

高真空排気装置を使う上でいくつかの注意点がある。油回転真空ポンプのオイルが少ないときは補充する必要がある。図 15 の油回転真空ポンプの赤い丸部分のなかにオイルがあるかどうかで判断する。油回転真空ポンプのオイルが油拡散ポンプに混じると、装置内部が高真空にならないことがある。そのときは油拡散ポンプを装置からはずし、中のオイルを取り替える。量は20[cc]。



図 14. 高真空排気装置



図 15. 油回転真空ポンプと油拡散ポンプ

2.7 増幅器(マイクロボルトメーター)

熱電対から発生する電圧は小さいため、実験では増幅器(マイクロボルトメーター)を使用している。POWER を押して点灯すれば、増幅器の電源が入ったことになる。ZERO SET と ZERO SUPP のつまみで、針の位置を調整する。FUNCTION は増幅器が読み取る電圧の単位を変える。RANGE は読み取る電圧の最大値を調整する。INPUT は測定する電圧のプラス、マイナス極につなげる。この INPUT に繋げた電圧の値が針で表示される。測定された電圧は±10V に増幅され、OUT のコードを通して端子から出力される。これをオシロスコープ、D/A 変換器に繋げる。

実験では FUNCTION は μV 、RANGE は 2500 に設定している。つまり電圧は 0~2500 [μV] まで測定でき、その電圧を増幅して出力する。針の位置で零点を調整することができるので、黒体放射板が零度以下になり-の電圧が発生するときは零点を変える。

増幅器を自作製することも行った。図 18 は入力した電圧を抵抗の値によって増幅して出力する非反転増幅回路である。100 k Ω と 1k Ω の抵抗が繋がっていて、100 k Ω を 1k Ω で割りその値に 1 を足した値が出力される電圧となる(この場合入力電圧の 101 倍)。図 19 は実際に制作したもので OP07EPZ(購入先:RS、品番:523-0161)を使用している。しかし外気の温度によって出力される電圧の値に若干の変化が生じる、オフセット調整が難しいことから実際の実験ではマイクロボルトメーターを使用した。

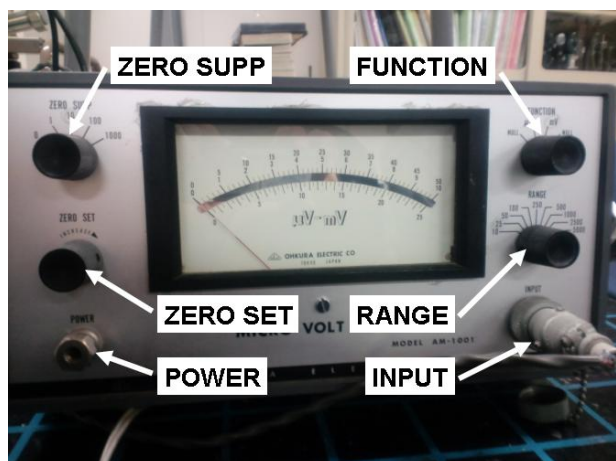


図 16. 増幅器正面

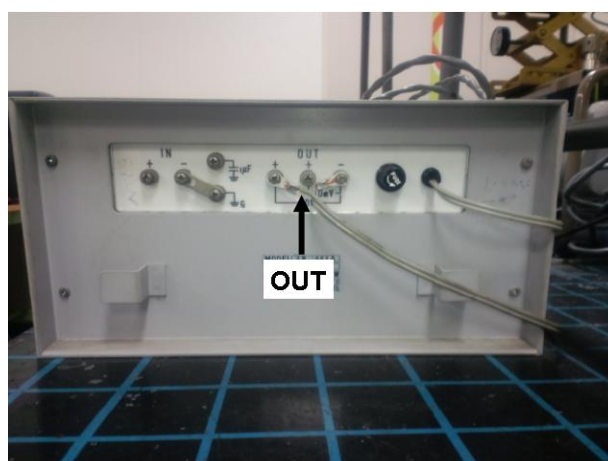


図 17. 増幅器背面

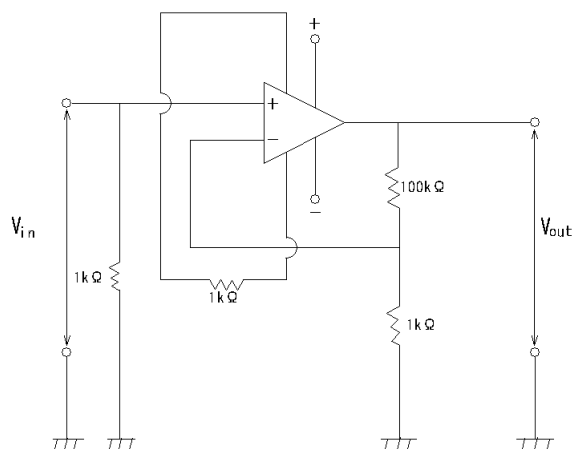


図 18. 非反転増幅回路

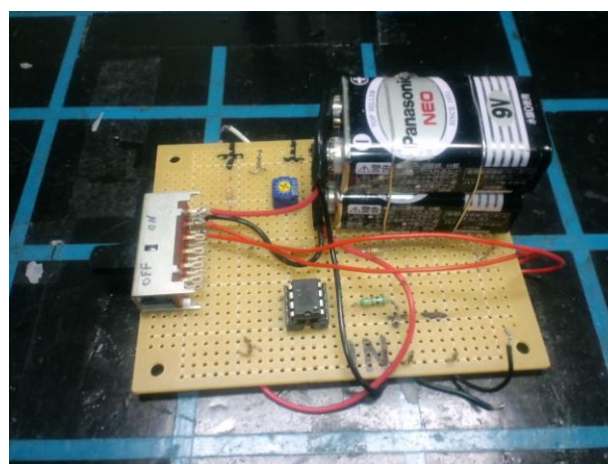


図 19. 増幅回路

2.8 D/A 変換器

増幅器の OUT から出力されている電圧を PC に記録するため、日本ナショナルインスツルメンツの D/A 変換器を使用する。Bit 数は 16 である。USB ケーブルより PC に接続できる。ネジで固定する端子台が複数あり、増幅器からのケーブルを接続する。使う端子台はプログラムの LabVIEW により設定できる。本実験では+極を AI0、一極を AI GND の端子から電圧を測定するように設定した。



図 20. D/A 変換器

2.9 プログラム

PC のプログラムは LabVIEW を使用した。操作画面は図 21 のようになる。設定できるのは、プログラムの「開始」と「停止」、増幅器で設定した最大電圧値を合わせるための「RANGE」、画面にグラフ(X 軸時間[ms]、Y 軸電圧[μ V])を出力するとき X 軸の間隔を調整する「プロット」である。本実験では RANGE は 2500、プロットは 10000 とした。

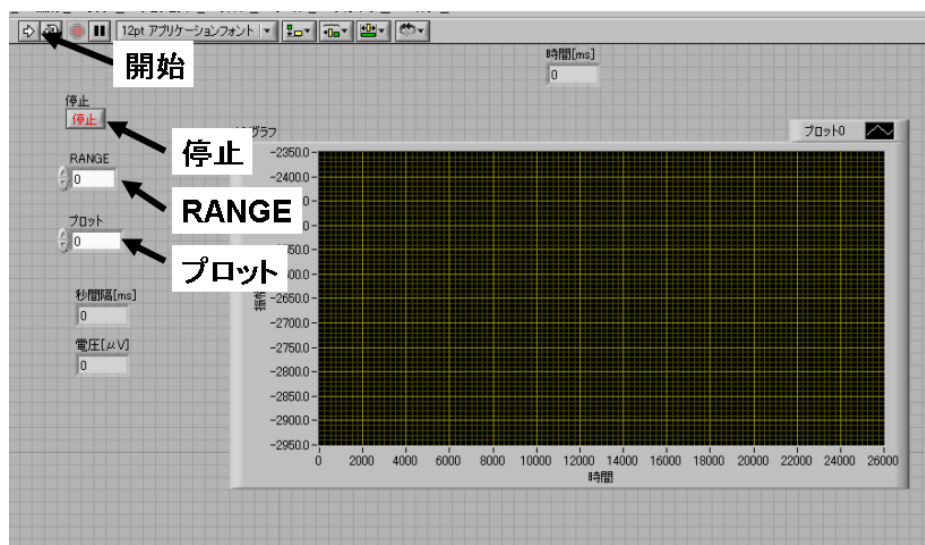


図 21. プログラム操作画面

第 3 章

実験方法

3.1 室内実験

室内実験では底を黒く塗装したアルミ容器、アルミ板を用意する。アルミ容器にはお湯を入れ高温にして、中にはんだを入れ高温を維持させる。このアルミ容器を放射冷却炉の真上に設置して、アルミ容器底から放射される熱エネルギーを黒体放射板に吸収させる。黒体放射板の温度は上昇するが、どの程度温度変化したのか測定するため、アルミ板をフタとして黒体放射板の窓材上に設置する。アルミ板は室内温度と同じであり、設置したときに黒体放射板は室内温度になる。フタを置く、はずす作業は10分間隔で行った。これは黒体放射板が室内温度から上昇して最高温度になるまでの反応時間のためである。

室内実験の測定結果は4章で説明する理論値と比較するため5章で述べる。

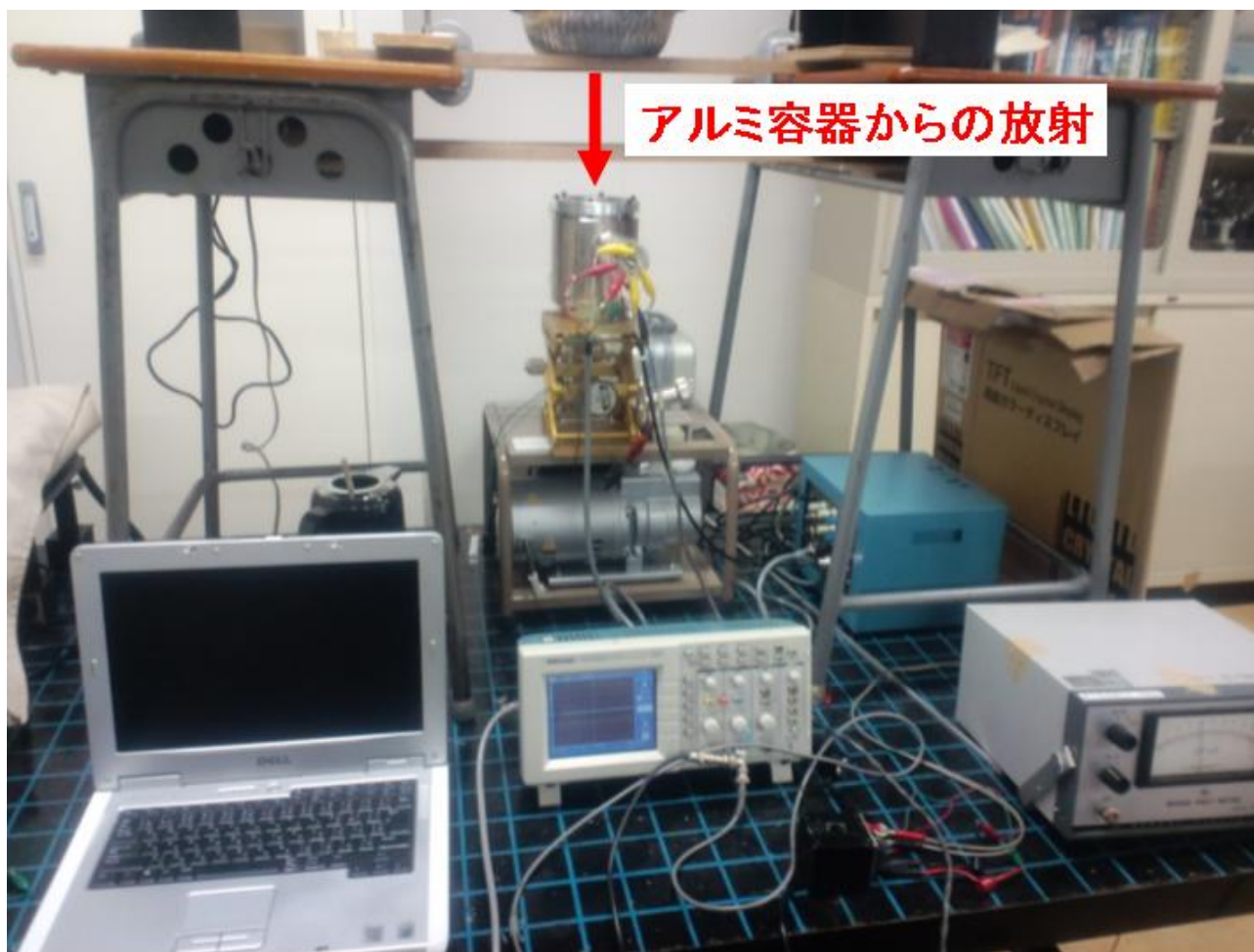


図 22. 室内実験

3.2 屋外実験

屋外実験は2009年12月21日、時刻21:00から行った。気温は $2.3[^\circ\text{C}]$ 、気圧は $1024[\text{hpa}]$ 。屋外実験を行う場合、晴れた日にしなければならない。雲があると、雲からの放射熱を黒体放射板は吸収してしまい温度変化は晴れた場合と比べ小さいためである。

この実験でもアルミ板をフタとして使用する。置く、はずす間隔は10分である。アルミ板をはずしたときに黒体放射板は大気からの放射熱を吸収して、放出していく。これにより黒体放射板は冷えていく。

屋外実験の測定結果は4章で説明する理論値と比較するため5章で述べる。



図 23. 屋外実験

3.3 実験手順

室内、屋外の実験手順は以下のように行う。また測定中はアルミ板を置く、はずす作業を10分間隔で繰り返している。

- (1) 高真空排気装置の LEAK、メインバルブが閉まっているか確認する。閉まっていれば R.P スイッチを ON にする。次に三方向バルブを上に向け、放射冷却炉の内部を粗引きする。1分経過したら三方向バルブを下に向け、D.P スイッチを ON にする。15分経過したらメインバルブを開ける。
- (2) 電離真空計の表示器とゲージの端子にケーブルを繋げる。電離真空計の電源を入れ、ZERO ADJ. のつまみを回し零点を調整する。FILAMENT のボタンを押し、TORR のつまみを回すことで放射冷却炉内の真空度を測定できる。
- (3) 氷をいれた容器に熱電対線の先端を入れる。熱電対と繋がっている銅線の+極に黒シールを貼ってある。氷からの銅線と放射冷却炉にある銅線の+極同士を繋げる。増幅器の INPUT からのクリップは、+極を氷に、-極を放射冷却炉の銅線(-極)につなげる。
- (4) 増幅器の電源を入れ、FUNCTION を μV 、RANGE を 2500 に設定する。ZERO SET と ZERO SUPP のつまみで、零点を調整する。
- (5) 増幅器の OUT からのケーブルをオシロスコープ、D/A 変換器に繋げる。
- (6) PC で LabVIEW を起動する。「RANGE」を 2500、「プロット」を 10000 に設定。「開始」をクリックすると保存先の選択画面がでる。「保存する」を選択すればエクセルのデータとして時間[s]と電圧[μV]が記録されていく。「停止」で測定が終了。
- (7) 高真空排気装置のメインバルブを閉め、D.P スイッチを OFF にする。油拡散ポンプの温度が下がったら、LEAK. V①を少し開け空気を入れてから閉めて、R.P スイッチを OFF にする。
- (8) 測定した電圧を式(2.1)式に代入して計算すれば、黒体放射板の変化した温度がわかる。

第4章

理論計算の概要

4.1 計算方法

今回は黒体放射板が放射するエネルギー量 E_1 [W/m²] を冷却量とし、センサーに入り込む量を加熱量として計算して冷却量と加熱量の釣り合いを求めて温度を求める。

まず初めに冷却量である黒体センサーが放射する熱量 $B(\lambda)$ を求める。

4.1.1 黒体放射板の放射熱 (E_1)

黒体放射板の放射熱 E_1 [W] は、プランクの法則より

$$B(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{(hc/\lambda kT)} - 1} \times \pi \times S \quad (4.1)$$

$B(\lambda)$: 黒体放射強度 [W/m]

h : プランク定数 = 6.626×10^{-34} [Js]

c : 光速 = 3×10^8 [m/s]

λ : 波長 [m]

e : 自然対数の底 = 2.718

T : 温度 [K]

S : 黒体放射板面積 [m²]

で求めることができ、 $B(\lambda)$ の積分値が黒体放射板のエネルギー放射量 E_1 となるので

$$E_1 = \int \{B(\lambda) \times \varepsilon_1\} d\lambda \quad (4.2)$$

E_1 : 黒体放射板の放射熱 [W]

$B(\lambda)$: 黒体放射強度 [W/m]

ε_1 : 黒体塗料放射率 (=1)

となる。

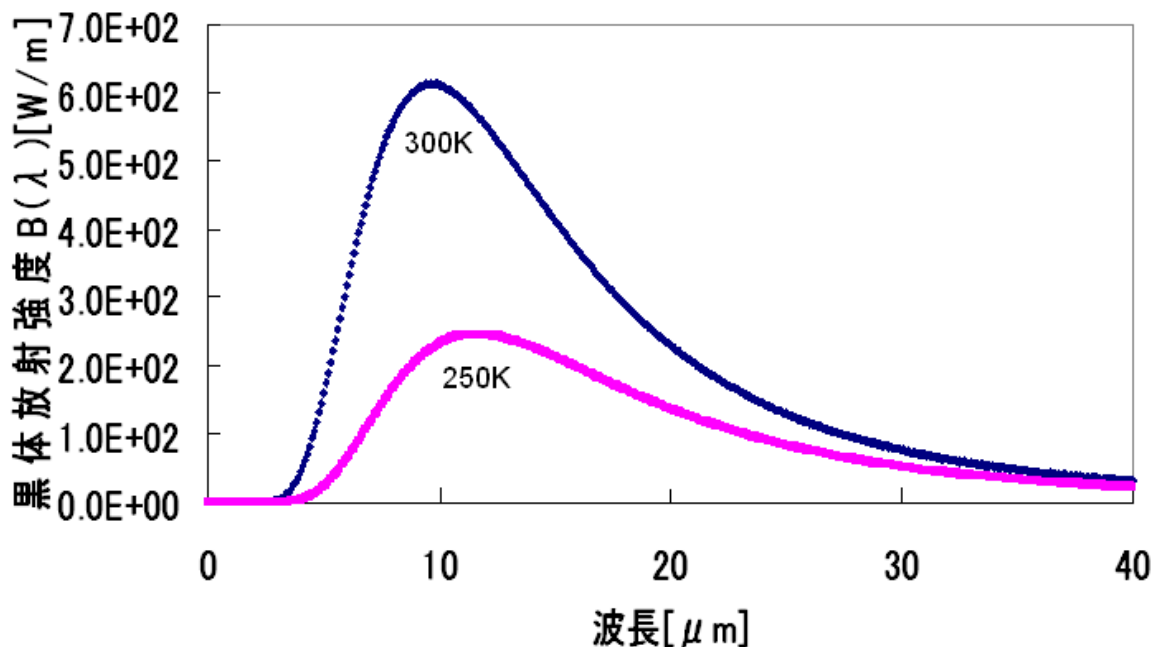


図 24. 温度ごとの黒体放射強度

4.1.2 窓材(ZnSe)について

次に、窓材(ZnSe)について考える。今回、窓材(ZnSe)は放射冷却炉のレンズの役割を果たす。各波長で透過率が決まっており透過率の高い範囲が広いのでZnSeを採用する。図25に示す窓材(ZnSe)の透過率 τ は、フーリエ赤外分光器で調べたものである。

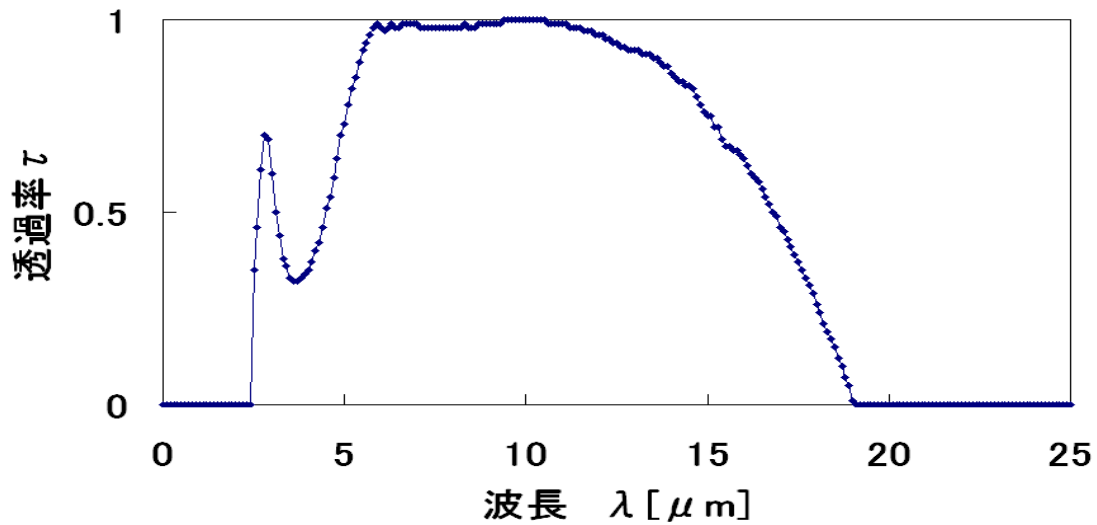


図 25. 窓材(ZnSe)の透過率 τ

透過率とは各波長に光をどのくらい通すのかを表しており 90%なら全体量の 90%を通す事になる。

逆に通さない分を放射率といい図 25 の透過率グラフの外側のことを指す。よって、放射率 ε_2 は 100%から透過率分を引いた数になるので

$$\varepsilon_2(\lambda) = 1 - \tau(\lambda) \quad (4.3)$$

$\tau(\lambda)$: ジンクセレン透過率

となる。

4.1.3 窓材(ZnSe)の放射熱 (E_2)

窓材(ZnSe)の放射は通過しない分が窓材に吸収され放射すると考えるので黒体放射強度 $B(\lambda)$ に放射率 ε_2 をかけた値が窓材(ZnSe)に吸収され放射する量となる。

$$E_2 = \int \{B(\lambda) \times \varepsilon_2(\lambda)\} d\lambda \quad (4.4)$$

E_2 : ジンクセレンの放射[W]

$B(\lambda)$: 黒体放射強度[W/m]

$\varepsilon_2(\lambda)$: ジンクセレン放射率

となる。

4.1.4 黒体放射板支持ワイヤーによる熱伝導 (E_3)

放射冷却炉内部に設置した黒体放射板を支えるのに十字に張ったワイヤー(今回はナイロンで直径 30[μ m]、長さ 85[mm])で支える。ここではその支持ワイヤーから黒体放射板に出入りする熱伝導 E_3 を計算する。株式会社ミュールツの HP よりナイロン 6 の熱伝導率を参考にする。支持ワイヤーによる熱量は下式で求めることができる。

$$E_3 = 4 \times \lambda \times \frac{S}{l} \times \Delta T \quad (4.5)$$

E_3 : 支持ワイヤーによる熱量 [W] λ : 熱伝導率 [W/mK]
 S : ナイロン線の面積 [m²] l : ナイロン線の長さ [m]
 ΔT : 温度差 [K]

(4.5)式で最初に 4 を掛けているのは黒体放射板を中心に 4 本伸びているからである。実際に計算してみる。外気温度を 3°C、黒体放射板の温度を -10°C、熱伝導率は一般に多く使われているナイロン 6 の熱伝導率 0.25 [W/mK]、長さは装置内壁の半径 42.5 とすると

$$\begin{aligned} E_3 &= 4 \times 0.25 \times \frac{7.07 \times 10^{-10}}{42.5} \times (3+10) \\ &= 2.16 \times 10^{-7} \text{ [W]} \end{aligned}$$

となる。

4.1.5 熱電対による熱伝導 (E_4)

黒体放射板からは 2 本の熱電対線(アルメル、クロメル)が伸びている。この熱電対線の熱伝導 E_4 を計算する。熱電対による熱伝導 E_4 は下式で求めることができる。

$$E_4 = \lambda \times \frac{S}{l} \times \Delta T \quad (4.6)$$

E_4 : 熱電対による熱伝導 [W] λ : 熱伝導率 [W/mK]
 S : 熱電対線の面積 [m²] l : 熱電対の長さ [m]
 ΔT : 温度差 [K]

実際に計算してみる。外気温度を 3°C、黒体放射板の温度を -10°C、熱伝導率はアルメルとクロメルそれぞれ 29.721 [W/mK]、19.256 [W/mK]、長さを 0.3 [m] とする。熱電対の場合、アルメル線とクロメル線とでそれぞれ計算する。アルメル、クロメルの熱伝導率は石川産業株式会社から送られてきたデータを参考にする。アルメル線を計算すると

$$\begin{aligned} \text{アルメル線} &= 29.721 \times \frac{1.96 \times 10^{-9}}{0.3} \times (3+10) \\ &= 2.53 \times 10^{-6} \text{ [W]} \end{aligned}$$

同様にクロメルも計算すると

$$= 1.64 \times 10^{-6} \text{ [W]}$$

となり、熱電対による熱伝導 E_4 はアルメル線とクロメル線を足した値になる。

$$\begin{aligned} E_4 &= (2.53 + 1.64) \times 10^{-6} \\ &= 4.17 \times 10^{-6} \text{ [W]} \end{aligned}$$

4.1.6 空気熱伝導による熱量 (E_k)

今回の研究では放射冷却炉の内部を真空にして測定する。しかし、ポンプで擬似的に真空にしても微量の空気は残る。ここでは、その空気の熱伝導による熱量を黒体センサーの温度と本体の温度との2つの状態から計算する。まず初めに分子の運動量 E を求める。分子の運動量 E は気体分子運動論で2原子1分子の式として

$$E = \frac{5}{2} \times k \times T \quad [\text{J}] \quad (4.7)$$

k : ボルツマン定数 = 1.381×10^{-23} [J/K] T : 温度 [K]

で与えられる。次に (4.7) 式から分子の速度計算を行う。分子の速度は、物理学の運動量と同じなので

$$\frac{1}{2} \times m \times V^2 = \frac{5}{2} \times k \times T \quad (4.8)$$

m : 質量[kg]、 V : 速度[m/s]

k : ボルツマン定数 = 1.381×10^{-23} [J/K]

T : 温度[K]

となりこの (4.8) 式を展開すると

$$V = \sqrt{\frac{5kT}{m}} \quad [\text{m/s}] \quad (4.9)$$

となる。ここでの m は、空気の主成分である窒素 N の質量となるので

$$m = \frac{\text{分子量}}{\text{アボガドロ定数}} \times 10^{-3} \quad [\text{kg}] \quad (4.10)$$

$$= 4.65 \times 10^{-26}$$

アボガドロ定数 : 6.02×10^{23} 分子量(N) = N の原子量 14×2

で求まる。しかし、分子は1方向に進む物ではなく 360 度ランダムに進む。なので (4.9) 式を x 方向の成分にしなければならない。 x 方向の分子速度 V_x は

$$V_x = \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}} \quad [\text{m/s}] \quad (4.11)$$

と与えられる。

次に、真空の時の空気密度について求める。まず初めに1気圧の時の密度 n を求める。1気圧時の密度 n は

$$n = \frac{\text{アボガドロ定数}}{22.4 \times 10^{-3}} \quad [\text{個}/\text{m}^3] \quad (4.12)$$

$$= 2.69 \times 10^{25} \quad [\text{個}/\text{m}^3]$$

となる。この密度 n を真空にした時の密度に変換する。真空時の密度 $n(\text{真})$ は、

$$n(\text{真}) = \frac{1\text{気圧時の密度}}{\text{圧力比}} \quad [\text{個}/\text{m}^3] \quad (4.13)$$

$$= 1.88 \times 10^{17} \quad [\text{個}/\text{m}^3]$$

となる。ここでの圧力比とは

$$\begin{aligned} \text{圧力比} &= \frac{\text{ポンプ到達圧力}}{1\text{気圧}[Pa]} \\ &= 7 \times 10^{-9} \end{aligned} \quad (4.14)$$

ポンプ到達圧力 : 0.0007 [Pa]

で求めることができる。

次に黒体と本体の間で分子が行き来する中、1秒間に黒体面積に分子があたる回数 N を求める。黒体面積に分子があたる回数 N は

$$N = \frac{V_x}{2 \times l} \quad [\text{回/s}] \quad (4.15)$$

V_x : x 方向の分子速度 l : 黒体と本体の間の距離

となる。次に、黒体面積と本体の間にある分子の数 U を求める。黒体面積の範囲にある分子の数 U は、

$$U = n \times S \times l \quad [\text{個}] \quad (4.16)$$

n : 真空時の密度 S : 黒体の面積
 l : 黒体と本体との間の距離

で求まる。

最後に空気熱伝導による熱量 E_5 を求める。空気による熱伝導 E_5 は

$$E_5 = U \times N \times \Delta E \quad [\text{W}] \quad (4.17)$$

U : 黒体面積の範囲にある分子数 [個] N : 1秒間に黒体面積に分子があたる回数 [回/s]
 ΔE : 分子運動量の差 [J]

で求まる。

実際に計算してみる。まず外気の温度を 3°C 、黒体放射板の温度を -10°C としてそれぞれの状態での分子の運動量 E 、分子速度 V を求めると

外気温度 3°C (状態 a) :

$$E_a = \frac{5}{2} \times 1.381 \times 10^{-23} \times (3 + 273) = 9.53 \times 10^{-21} \quad [\text{J}]$$

$$V_a = \sqrt{\frac{5 \times 1.381 \times 10^{-23} \times (3 + 273)}{4.65 \times 10^{-26}}} = 640 \quad [\text{m/s}]$$

黒体放射板温度 -10°C (状態 b):

$$Eb = \frac{5}{2} \times 1.381 \times 10^{-23} \times (-10 + 273) = 9.08 \times 10^{-21} \quad [\text{J}]$$

$$Vb = \sqrt{\frac{5 \times 1.381 \times 10^{-23} \times (-10 + 273)}{4.65 \times 10^{-26}}} = 625 \quad [\text{m/s}]$$

となる。次に平均速度 \bar{V} を計算しx方向の分子速度 Vx を求める。平均速度 \bar{V} は

$$\bar{V} = \frac{(Va + Vb)}{2} = \frac{(640 + 625)}{2} = 632 \quad [\text{m/s}]$$

となり、x方向の分子速度 Vx は

$$Vx = \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}} = 365 \quad [\text{m/s}]$$

となる。次に1秒間に黒体面積に分子があたる回数 N を求めと

$$N = \frac{Vx}{2 \times 1} = \frac{365}{2 \times 0.02} = 9129 \quad [\text{回/s}]$$

となる。黒体面積と本体の間にある分子の数 U を求める。

$$U = n \times S \times l = 1.96 \times 10^5 \times 0.02 \times 1.88 \times 10^{17} = 7.39 \times 10^{10} \quad [\text{個}]$$

となる。最後に空気の熱伝導 E_5 を求める。

$$\Delta E = Ea - Eb = (9.53 \times 10^{-21}) - (9.08 \times 10^{-21}) = 4.49 \times 10^{-22}$$

$$E_5 = U \times N \times \Delta E = 9129 \times 7.39 \times 10^{10} \times 4.49 \times 10^{-22} = 3.03 \times 10^{-7} \quad [\text{W}]$$

となる。

以上の計算結果からそれぞれの放射熱についての比較を表1に示す。表1より空気、熱電対、黒体支持ワイヤーによる熱伝導は黒体放射板の放射熱に比べ非常に小さいため放射に影響を及ぼさないと考える。

表 1. 黒体放射板の放射熱に対するそれぞれの放射熱(外気温度 3°C 、黒体温度 -10°C)

黒体放射板の放射熱	空気の熱伝導	熱電対による熱伝導	黒体支持ワイヤーの熱伝導
4.92E-03	3.03E-07	4.17E-06	2.16E-07

4.1.7 大気からの放射(屋外実験の時) E_5

最後の加熱要素として大気からの放射 E_5 について考える。空に向けて放射冷却炉を設置したとき大気からの放射の影響を受ける。

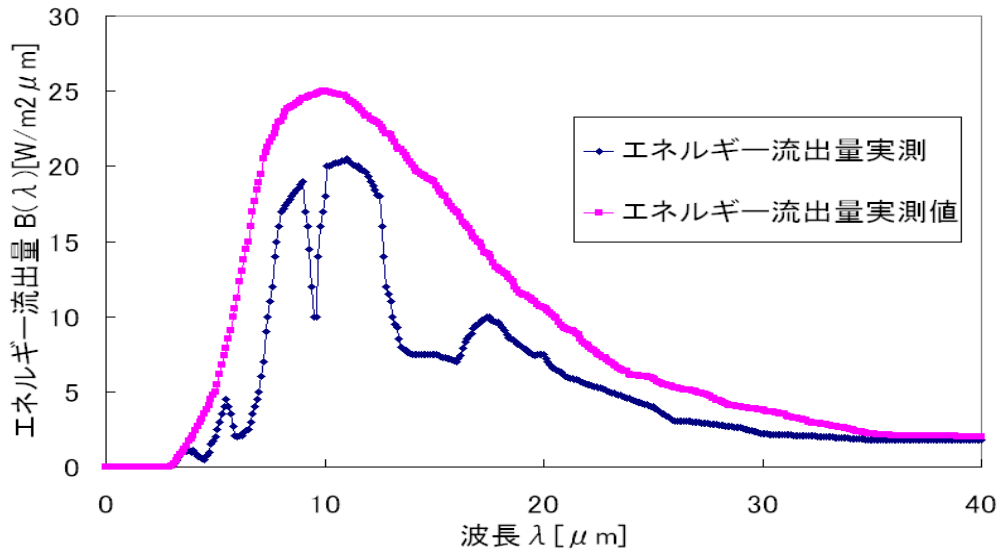


図 26. 曇り時のエネルギー放射量

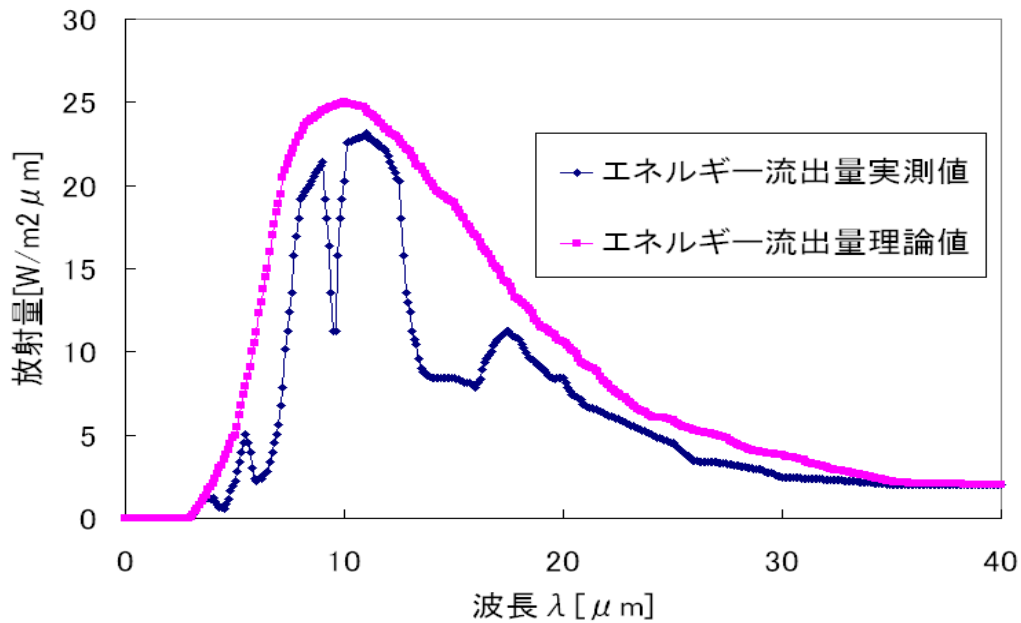


図 27. 晴れ時のエネルギー放射量

図 26 と図 27 は American Meteorological Society にあったグラフをプロットしたものである。今回はエネルギー流出量理論値とエネルギー流出量実測値の間の範囲が大気に吸収される割合として考える。よって、実測値の割合を透過率 τ として放射率 ϵ_3 を求める。そして本体内部に入るときに窓材を通過して黒体放射板に届くので

$$E_5 = \int \{B(\lambda) \times \epsilon_3(\lambda) \times \tau(\lambda)\} d\lambda \quad (4.18)$$

$B(\lambda)$: 黒体放射強度 [W/m]

$\epsilon_3(\lambda)$: 大気の放射率

$\tau(\lambda)$: 窓材の透過率

で求まる。

大気の放射は屋外実験の場合であって、室内ではアルミ容器からの放射を求める。

4.1.8 アルミ容器からの放射(室内実験の時) E_3

4.1.7 で述べた大気からの放射は屋外実験の時のみであって室内実験ではアルミ容器からの放射に置き換わる。アルミ容器からの放射は窓材を通して黒体放射板に届くので

$$E_3 = \int \{B(\lambda) \times \varepsilon_1 \times \tau(\lambda)\} d\lambda \quad (4.19)$$

$B(\lambda)$: 黒体放射強度 [W/m] ε_1 : 黒体塗料放射率(=1)
 $\tau(\lambda)$: 窓材の透過率

となる。

以上のエネルギー量を計算して熱が釣り合う黒体放射板の温度を算出する。

4.2 室内実験の理論計算

今回は黒体放射板の放射を冷却量としその黒体放射板に入り込む熱量を加熱量として釣り合いを求めセンサーの温度を求める。釣り合った温度が黒体センサーの温度となる。よって

$$\int E_1(\lambda) d\lambda = \int E_2(\lambda) d\lambda + \int E_3(\lambda) d\lambda \quad (4.20)$$

$E_1(\lambda)$: 黒体放射板の放射熱 $B(\lambda) \times \varepsilon_1$ [W/m]
 $E_2(\lambda)$: 窓材からの放射熱 $B(\lambda) \times \varepsilon_2(\lambda)$ [W/m]
 $E_3(\lambda)$: アルミ容器からの放射熱 $B(\lambda) \times \varepsilon_1 \times \tau(\lambda)$ [W/m]

ε_1 : 黒体塗料放射率(=1) ε_2 : 窓材の放射率 $\tau(\lambda)$: 窓材の透過率
 $B(\lambda)$: 黒体放射強度(プランクの法則より)

となる。

4.3 屋外実験の理論計算

屋外実験の理論計算は室内実験と同様に

$$\int E_1(\lambda) d\lambda = \int E_2(\lambda) d\lambda + \int E_3(\lambda) d\lambda \quad (4.21)$$

$E_1(\lambda)$: 黒体放射板の放射熱 $B(\lambda) \times \varepsilon_1$ [W/m]
 $E_2(\lambda)$: 窓材からの放射熱 $B(\lambda) \times \varepsilon_2(\lambda)$ [W/m]
 $E_3(\lambda)$: 大気からの放射熱 $B(\lambda) \times \varepsilon_3 \times \tau(\lambda)$ [W/m]

ε_1 : 黒体塗料放射率(=1) ε_2 : 窓材の放射率 ε_3 : 大気の放射率
 $\tau(\lambda)$: 窓材の透過率 $B(\lambda)$: 黒体放射強度(プランクの法則より)

で求める。

※実験の理論計算で空気、黒体支持ワイヤー、熱電対の熱伝導は非常に微小な値のためほぼ0と置いている。

4.4 アルミ容器の放射率の補正

室内実験においてアルミ容器は黒体放射板と熱のやり取りを行っているが、アルミ容器底から放射される熱量は全部黒体に向かうわけではない。放射はあらゆる角度に放射しており黒体に向かう熱量はごく一部である。よって、アルミ容器自体は黒体と熱のやり取りをしていると同時に周囲の空気とも熱のやり取りをしていると考えられる。

アルミ容器の放射率は見かけの放射率

$$\text{見かけの放射率} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^4 \quad (4.22)$$

ε : 黒体塗料放射率

T_0 : 外気温度

T_1 : アルミ容器黒体温度

で補正する。

本研究では黒体塗料の放射は1と定めている。よって、アルミ容器の放射率は黒体放射板の放射率と同じとなる。

第5章

測定結果及び考察

5.1 室内実験及び屋外実験の温度到達率

図 28 と図 29 は室内実験と屋外実験の測定結果を表す。室内実験では実測値が 34.4℃、理論値が 40.7℃である。屋外実験では実測値が-15.8℃、理論値が-28.5℃である。黒体放射板の温度変化の理論値に対する実測値の割合（温度到達率 R ）は、室内実験が 67%、屋外実験が 60%であった。

室内実験、屋外実験共に実測値は、理論値と比べると低い結果となった。金メッキによる熱の反射、ZnSe の温度変化、大気からの放射量などが誤差の要因として考えられ、検討していく必要がある。

図 30 は 2010 年 1 月 19 日の 15:00 から屋外で行った実験である。天気は晴れであった。アルミ板を設置しているときは黒体放射板の温度が 18℃ほどであり、はずしたときは約 10℃下がった。夜 21:00 以降から開始した図 29 の屋外実験の値と比べると、温度変化が小さい。昼と夜で、反応の違いがでる原因として、雲の量、太陽からの熱エネルギーが空から反射され影響したなど考えられるがはっきりとわかっていない。

温度到達率 R は

$$\text{温度到達率 } R = \frac{\text{温度変化(外気～実測値)}}{\text{温度変化(外気～理論値)}} \times 100 \quad (5.1)$$

となる。

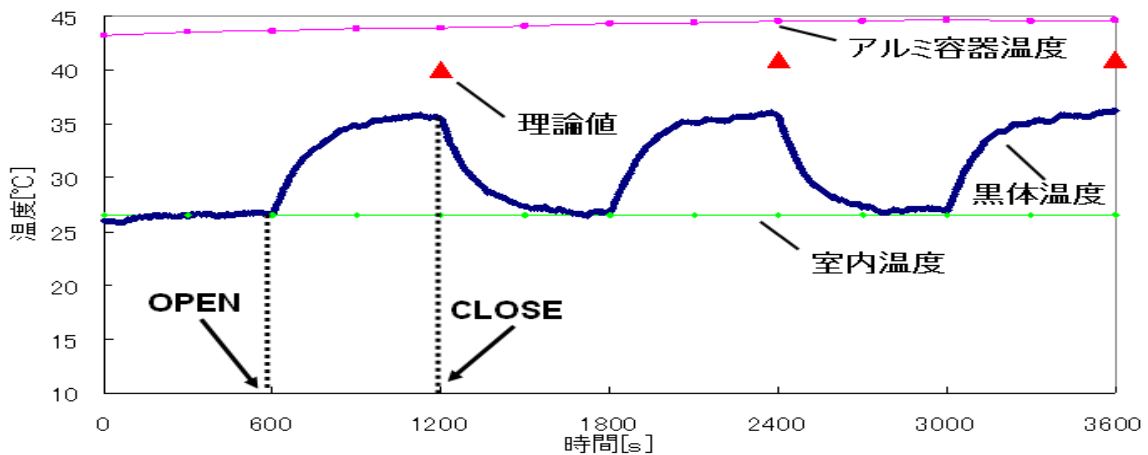


図 28. 室内実験の測定結果(室内温度 26.5℃、温度到達率 67%)

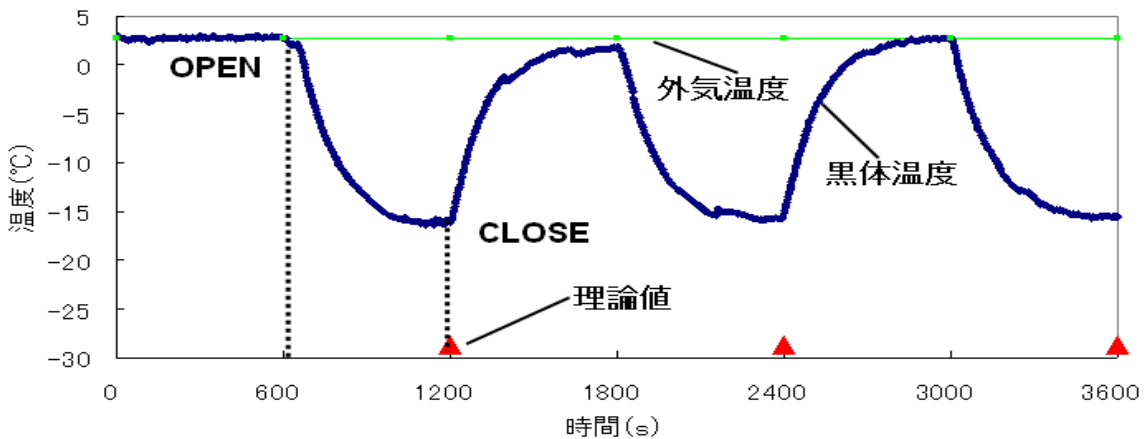


図 29. 屋外実験の測定結果(外気温度 2.8℃、温度到達率 60%)

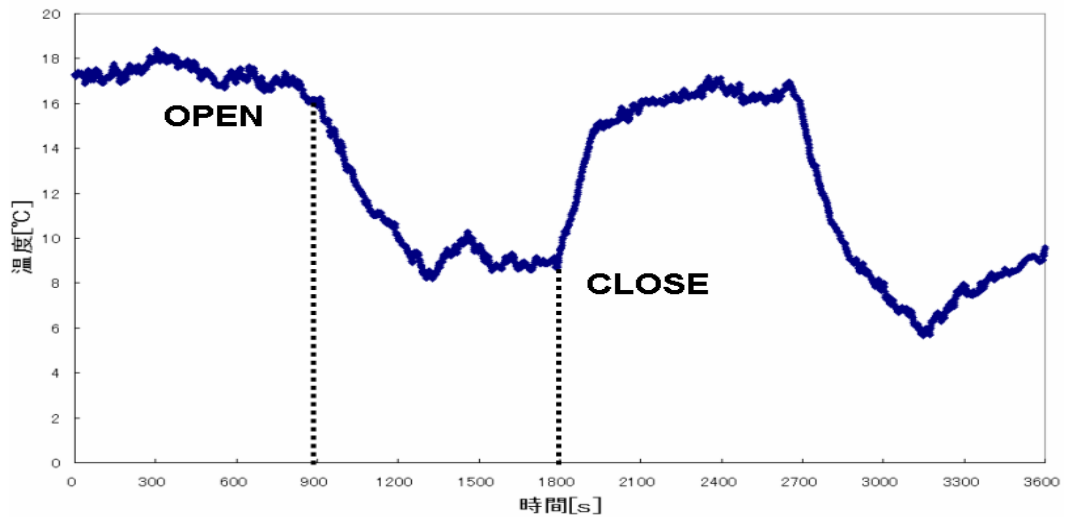


図 30. 屋外実験の測定結果 (15:00~16:00)

5.2 温度の伝わりが遅れ

室内実験の時はアルミ容器の温度が一定であったが最初の段階では鍋の温度は一定にしない、つまり熱湯を入れたアルミ容器を置くだけであった。この時、アルミ容器の温度は下がり続けやがて室温になる。その際の実験結果は図 31 のようになった。

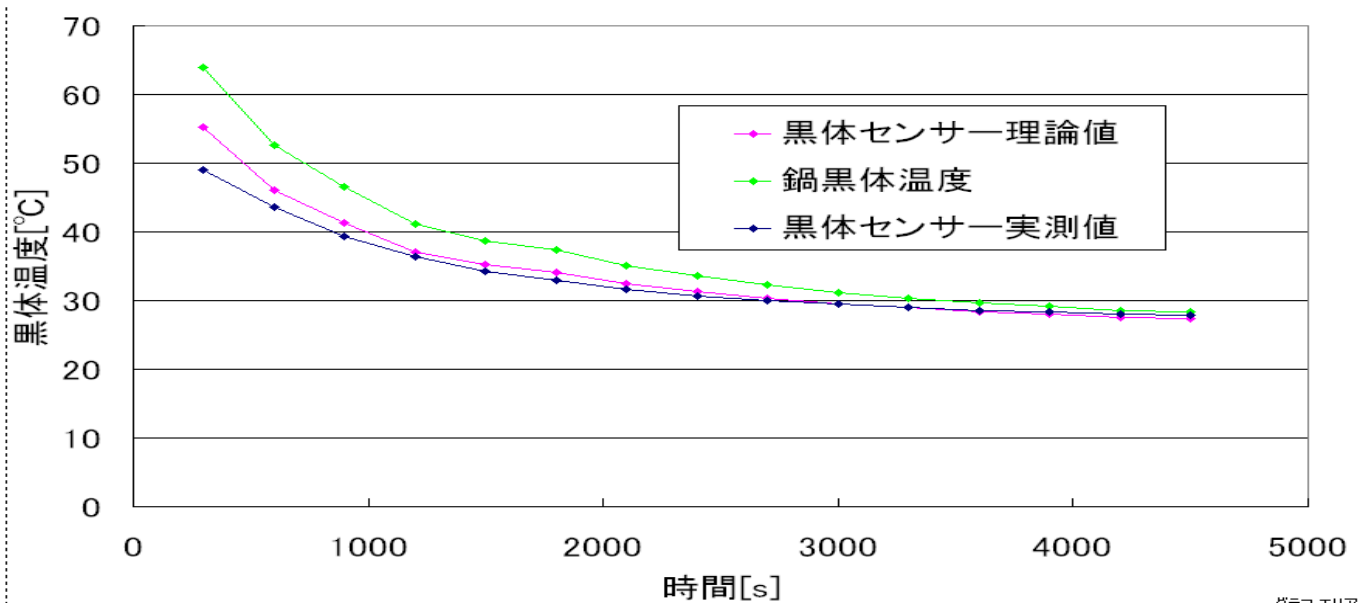


図 31. アルミ容器の温度による黒体反応

これはアルミ容器の温度が一定でないことから温度の伝わりに遅れが生じる、つまり時定数が生じていると考えられる。時定数とは、その分の時間の遅れを表す。時定数は図 32 のように最終到達温度から全体の 0.36 の所までの時間となる。

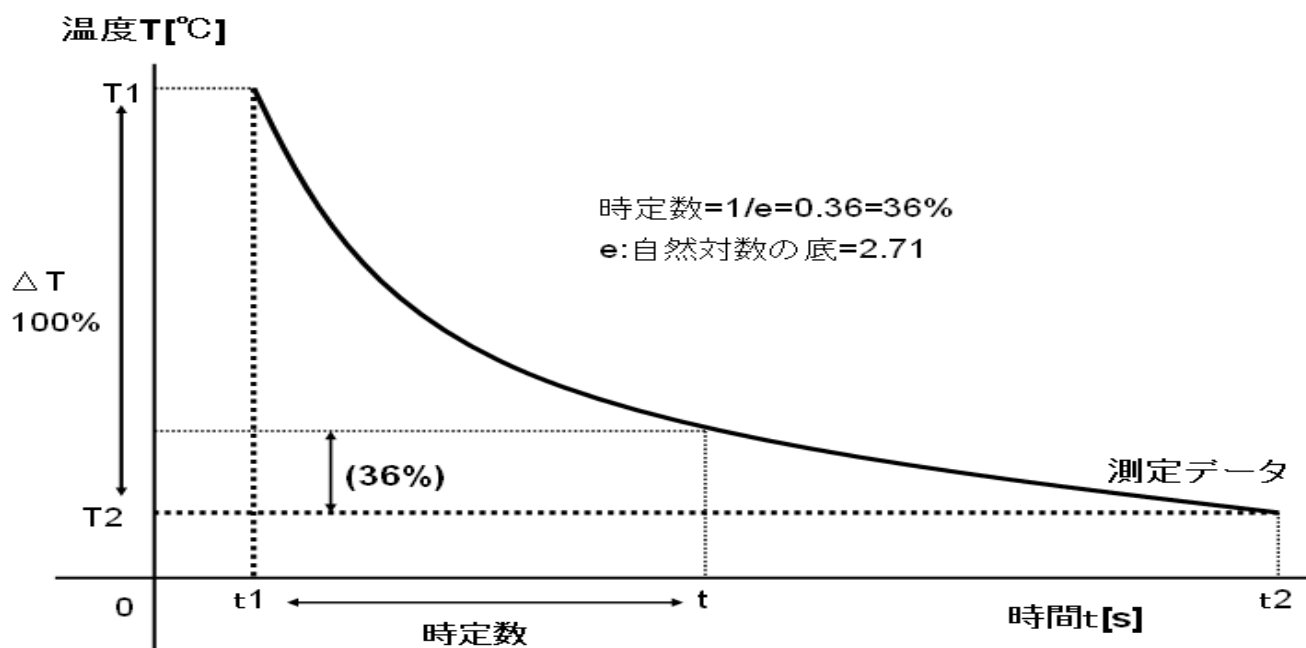


図 32. 時定数

計算してみると約 120 秒(2 分)ほどの遅れが生じている。よって、図 31 の理論値のグラフを 120 秒遅らせる。結果は図 33 のようになった。

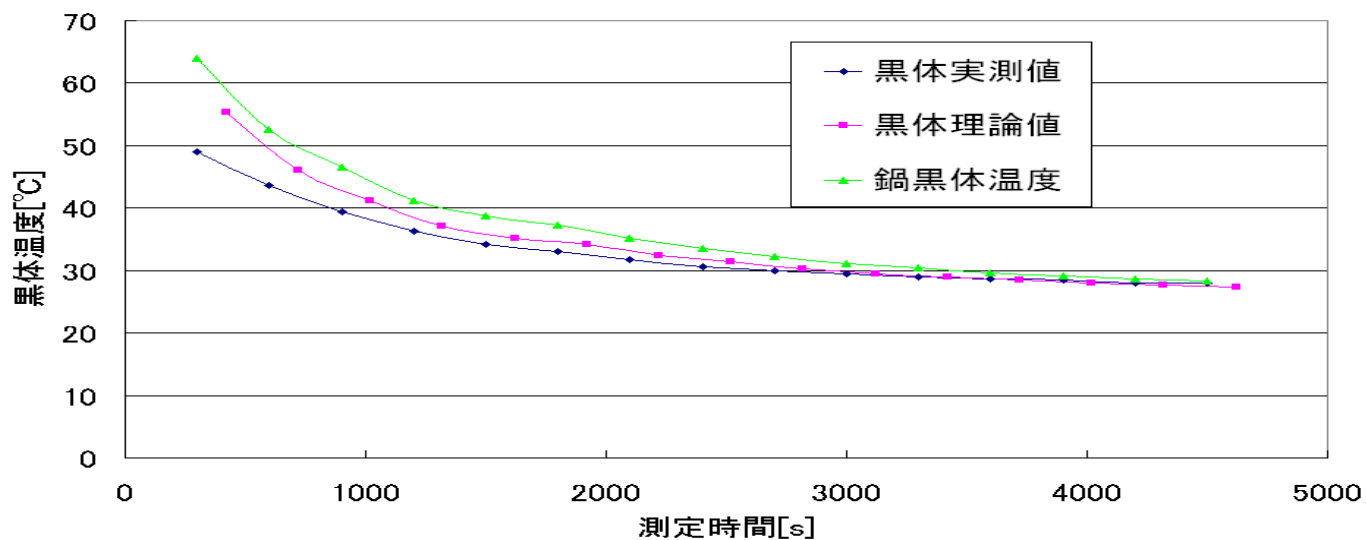


図 33. 時定数補正した実験結果

図 33 から実測値と理論値の誤差は大きくなるがアルミ容器を一定にした時の結果を比べると同じくらいの誤差になることがわかる。この事から室内、屋外実験はアルミ容器を一定に保ちながら測定を行った。

5.3 空気の熱伝導による影響

図 34 は室内実験において、アルミ容器の温度を一定にして、黒体放射板の温度を真空度別に調べたものである。条件は大気状態の非真空、油回転ポンプのみ動かした RPOMP、 2.8×10^{-2} [Pa]、 4.2×10^{-3} [Pa]。アルミ容器の温度は約 40°C である。

黒体放射板の温度は、非真空が約 25°C 、RPOMP は約 28°C 、 2.8×10^{-2} [Pa] では約 31°C 、 4.2×10^{-3} [Pa] では約 30°C になった。空気の熱伝導が起こる非真空が黒体放射板の温度が最も低い。油回転ポンプと油拡散ポンプを両方動かした 2.8×10^{-2} [Pa] と 4.2×10^{-3} [Pa] に比べると $5, 6^{\circ}\text{C}$ の差が生じた。この結果から空気の熱伝導によって黒体放射板の温度に対する影響が大きいことがわかる。

最も真空度の高い 4.2×10^{-3} [Pa] が 2.8×10^{-2} [Pa] と比べると少し温度が低くなった。これは熱電対線に繋がっている銅線の温度変化、室内温度などの影響と考えられる。真空度が 2.8×10^{-2} [Pa] までになれば、それ以降高くなっても空気の熱伝導による黒体放射板の温度の影響は少ないと思われる。

5.1 の室内実験と屋外実験では、真空度は 4.2×10^{-3} [Pa] だった。よって実測値と理論値の誤差において、空気の熱伝導による影響は非常に少ないと考えられる。

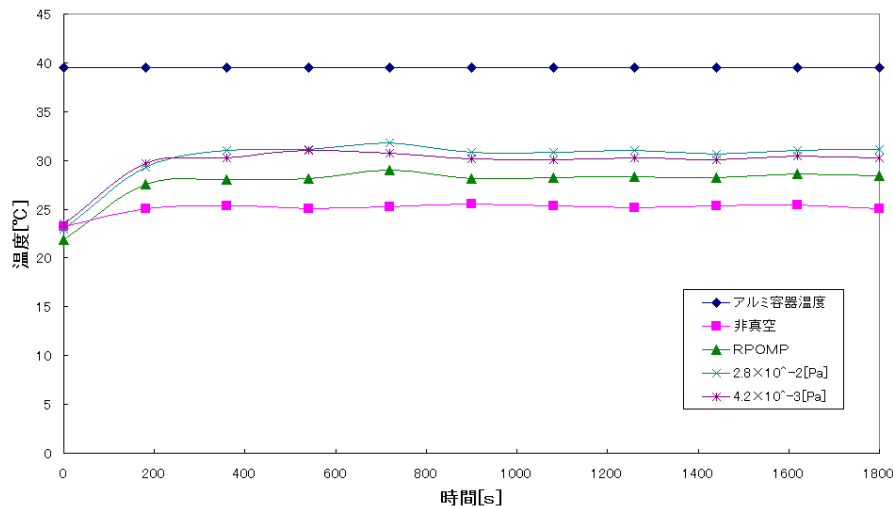


図 34. 真空度別の反応

5.4 放物面鏡の反射による影響

理論値と実測値の誤差の原因の一つとして装置の底にある放物面鏡の反射の影響が挙げられる。外部から黒体放射板に入り込む放射熱は放物面鏡に反射して熱を伝える。理論計算では放射熱全てを反射させることを前提に計算を行った。しかし実際には反射の際、放物面鏡に施した金メッキにいくつか吸収され放射熱を少なく伝えている。金の放射率(吸収率)は 0.02 であり残りの 0.98 を黒体放射板に反射している。ただしこの数値は理想状態の場合の数値であり実際は表面に付いた埃でより反射率が悪くなっていると考えられる。

そこで金の放射率を $0.9 \sim 1$ まで変化させ理論計算を行う。理論計算は、窓材の放射熱と大気からの放射熱にそれぞれの金の放射率を掛け、金メッキの放射熱を考慮し釣り合いを見る。金メッキの放射熱は

$$\text{金メッキの放射熱} = \int \{B(\lambda) \times \varepsilon_A\} d\lambda \quad (5.2)$$

$B(\lambda)$: 黒体放射強度 [W/m] ε_A : 金の放射率

で求める。図 35、図 36 に各反射率に対する理論値を示す。その結果、室内と屋外において反射率下げていくと理論値が実測値に近づくことがわかった。室内の実験で金の反射率を 0.98 とすると、理論値が 40.2℃、温度到達率が 69%と反射率が 1 の時(67%)より良くなった。反射率が 0.9 の場合は 75%になった。よって、金の反射率は理論値と実測値の誤差に影響を与えていると考えられる。

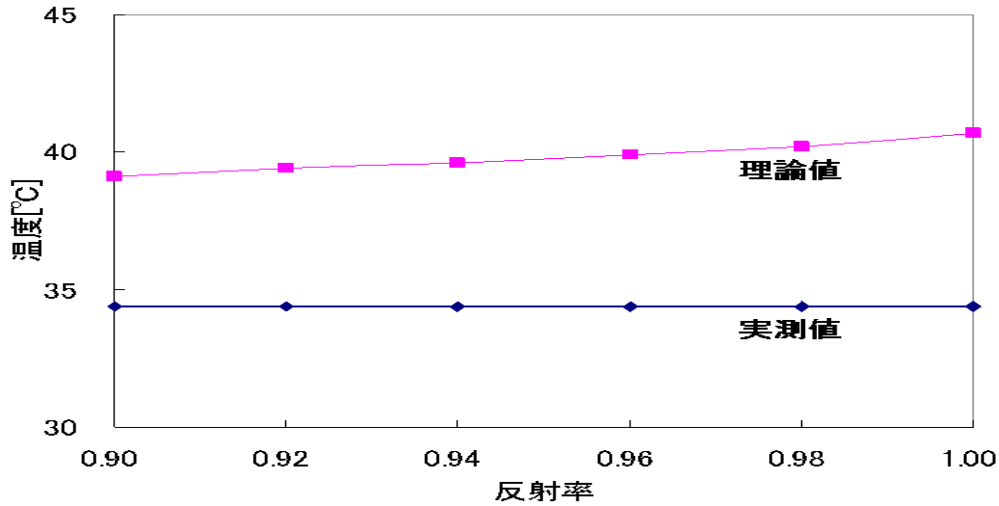


図 35. 金の反射率毎の理論値と実測値(室内実験)

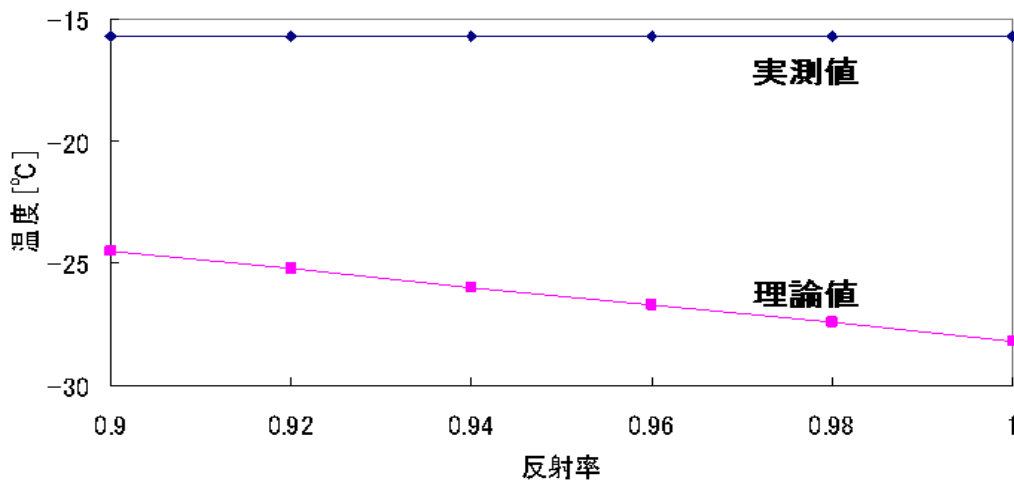


図 36. 金の反射率毎の理論値と実測値(屋外実験)

5.5 大気の放射率について

屋外実験の理論計算の誤差として、大気の放射率が上げられる。第 4 章で大気の放射熱について計算を行ったがその際の大気の放射率は衛星観測データを基にした。

図 37 は「光の気象学」に記載されている放射率のグラフをプロットしたものである。このグラフは熱帯モデル大気の大気上端から計算した値である。この放射率を使い黒体放射板の温度を再度計算した。その結果、理論値が-18.4℃、温度到達率が 88%になり実測値に近づいた。図 38 に再度計算した理論値を示す。

しかし、室内実験においては大気の放射率は関与しないため他の原因が考えられる。また、金メッキの反射率を考慮すると図 39 のようになった。図 39 より反射率を下げていくと実測値に近づいた。反射率が 1 の場合に温度到達率は 88%、反射率が 0.9 の場合に温度到達率は 98%という結果が出た。

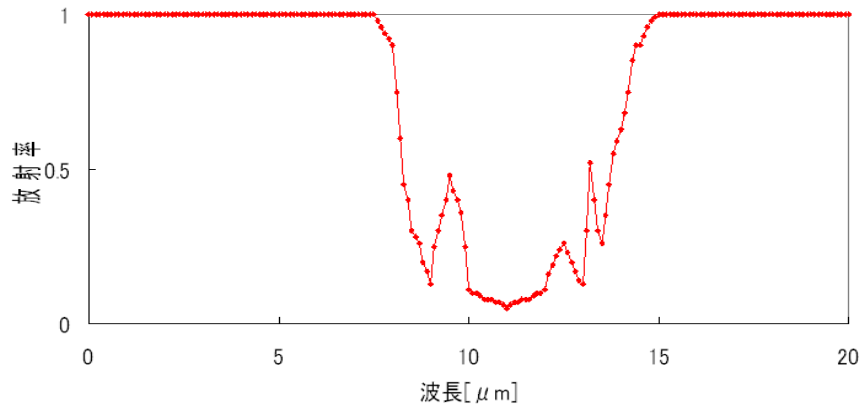


図 37. 大気の放射率

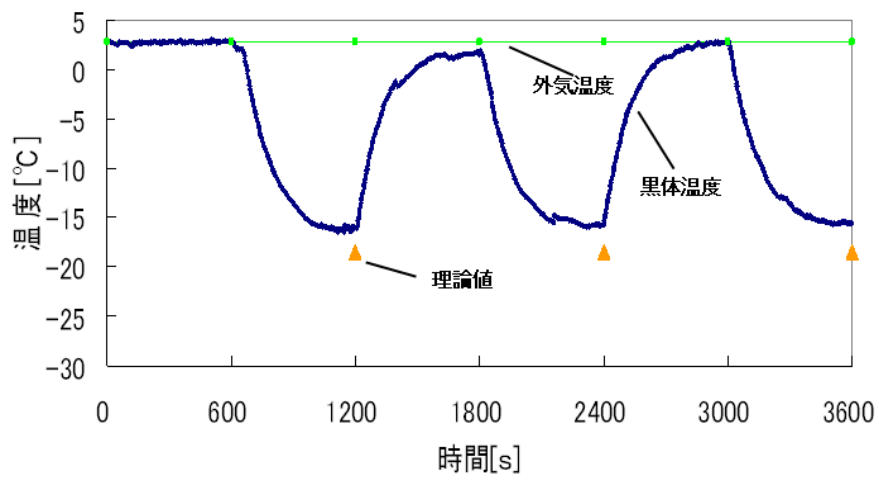


図 38. 屋外実験の理論値と実測値(外気温度 2.8°C、温度到達率 88%)

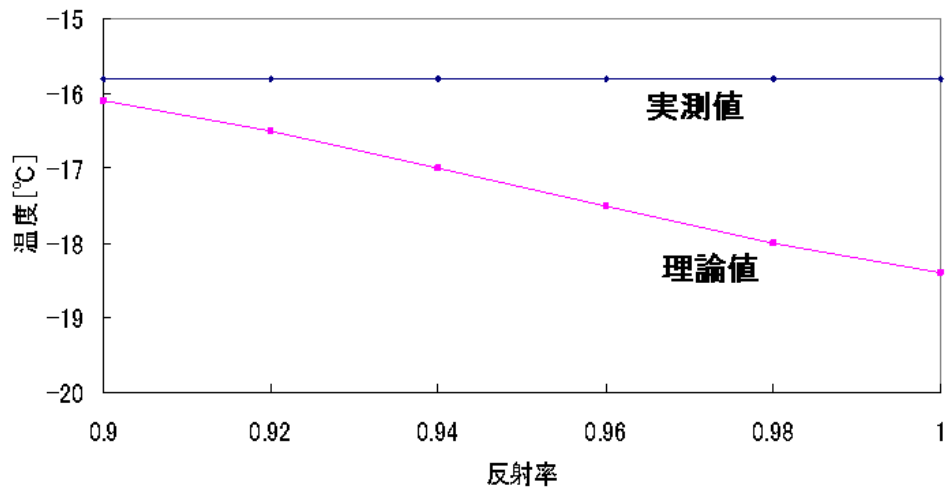


図 39. 金の反射率毎の理論値と実測値

5.6 熱容量による放射への影響

今までは理論計算を中心に考えていたが、ここでは実測値を中心に考察する。図 40 は 5.1 の図 29 を 2500 秒～3600 秒までを拡大したものである。このときの黒体放射板の単位時間における温度変化について考える。単位時間における温度変化、放射熱、熱容量の関係で表すと

$$m = \frac{Q}{C} \quad (5.3)$$

m : 単位時間における温度変化 [K/s] Q : 単位時間における黒体放射板の放射熱 [W]
 C : 熱容量[J/K]

となる。(5.2)式から熱容量 C が増えるほど m が少なくなることがわかる。よって黒体スプレーで黒体放射板の厚さが増加し実測値の温度変化を少なくしていると考えた。そこで屋外実験の測定データの傾きを実測値とし、それに対する理論値を計算した。計算方法としてまず熱容量 C を計算する。

熱容量 C は

$$C = \text{比熱}[\text{J/gK}] \times \text{面積}[\text{cm}^2] \times \text{厚さ}[\text{cm}] \times \text{比重}[\text{g/cm}^3] \quad (5.4)$$

で求める。黒体放射板は銅箔(40 μm)と黒体スプレー(60 μm)とそれぞれ計算する。実際に計算すると

銅箔(40 μm):

$$C_1 = 0.38 \times 0.20 \times 0.004 \times 8.8 = 0.0026 \quad [\text{J/K}]$$

黒体スプレー(60 μm):

$$C_2 = 1.612 \times 0.20 \times 0.006 \times 1.19 = 0.0023 \quad [\text{J/K}]$$

となり、全体の熱容量 C は銅箔とスプレーを足したもののなので

$$C = C_1 + C_2 = 0.0026 + 0.0023 = 0.0049 \quad [\text{J/K}]$$

となった。

次に熱量 Q を計算する。放射熱 Q は黒体放射板の温度が空気の熱伝導の少ない外気温度と同じ時の熱の釣り合いを見る。よって計算すると黒体放射板の放射熱が 0.0059[W]、窓材(ZnSe)の放射熱は 0.0025[W]、大気の放射熱(衛星データ使用)が 0.0012[W] であって釣り合いをみると

$$Q = 0.0025 + 0.0012 - 0.0059 = -0.0022 \text{ [W]}$$

という値がでた。ここでマイナスの数値が出たのは冷却されているので熱量がマイナスで出る。最後に瞬間温度 m について計算すると

$$m(\text{理}) = \frac{Q}{C} = \frac{-0.0022}{0.0049} = -0.45 \text{ [K/s]}$$

という計算結果が出た。

理論値が求まったので次に実測値を求める。実測値は図 40 を使う。このグラフの温度が下がる時のグラフの温度変化を求める。その結果、実測値は 25 秒で 3°C 冷えるので

$$m(\text{実}) = \frac{-3}{25} = -0.12 \text{ [K/s]}$$

となる。理論値と比較すると理論値の方が 3.8 倍大きく出ていることがわかった。この結果を基に理論値の黒体スプレーの厚さがどのくらいで同じになるのか調べる。黒体スプレーの厚さを大きくし、いくらで理論値と実測値が同じになるのかを見る。その結果、黒体スプレーの厚さを 0.45mm にしたところ理論値と実測値が同じになった。銅箔の分を含めると約 0.5mm と少し厚くなる結果となった。以上のことから厚みが増せばその分だけ瞬間温度変化に影響を及ぼすことがわかった。本研究でも黒体放射板に塗布した黒体スプレーや接着剤などで黒体放射板の厚さが増し放射に影響を及ぼしたと考えられる。

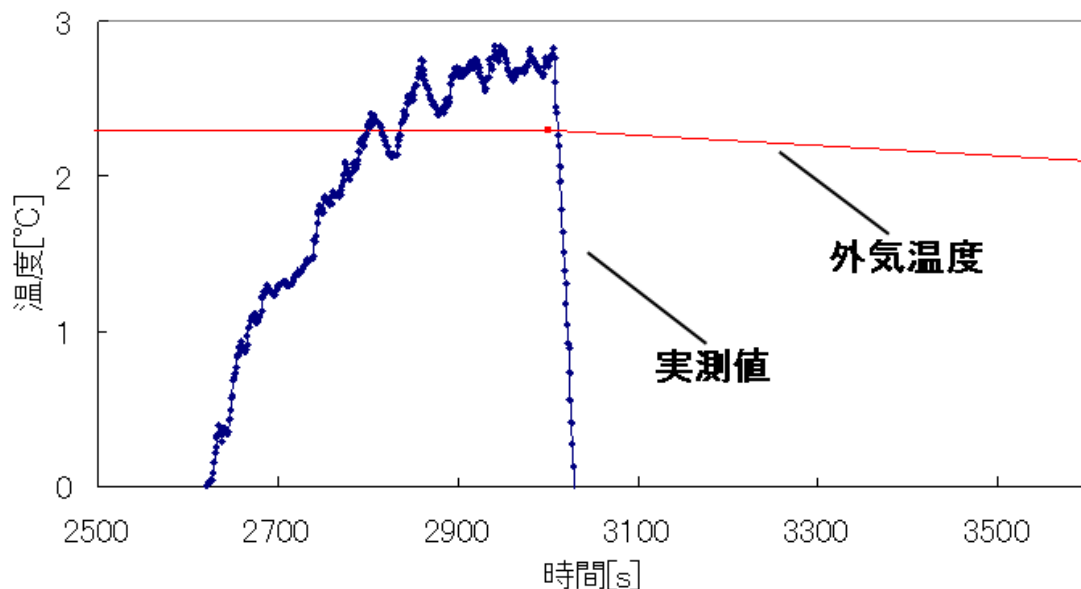


図 40. 黒体放射板の温度変化

第 6 章

結言

放射冷却による熱の放射について理論的に解析していくため放射冷却実験装置を開発した。そして実験装置内部は空気による熱伝導の影響がないように真空状態とした。放射冷却炉を空に向け、放射冷却の現象を利用することで放射冷却炉内部の黒体放射板は外気温度から 18℃冷える結果となった。

しかし室内と屋外実験の実験値は、理論値と比べ67%と60%と低い結果となった。放物面鏡からの反射、大気の放射のなどを考察していくと、実測値と理論値のズレは少なくなった。大気の放射率を変え、金メッキの反射率が0.9とすると、室内と屋外の到達率は75%、98%になった。まだ実測値と理論値のズレの原因がはっきりと解明できてないので、今後検討していく必要がある。

将来的には、大気の温暖化ガスからの放射量について地上から調査できる測定器としての可能性があると考えている。

参考文献

- 1) 非電化工房 <http://hidenkaseihin>.
- 2) J.T.Kiehl and Kevin E Trenberth, "Earth's Annual Global Mean Energy Budget", Bulletin of the American Meteorological Society, Vol.78, No.2, February 1997, 197-208.
- 3) 岡本芳三 他, 「赤外放射計による斜度係数の測定とその応用」, 日本機械学会論文集 (B 編), 57 (534), 699-703
- 4) 柴田清孝: 「光の気象学」 朝倉書店
- 5) 岩澤孝治, 大三宗康共著: 「見方・かき方オペアンプ回路」 オーム社
- 6) 堀桂太郎: 「図解 LabVIEW 実習」 森北出版株式会社
- 7) 株式会社ミュールッツ <http://muroz.co.jp/thermalScience/thermalConductivity.html>

謝辞

本研究を行うに当たり、ご指導を頂いた河村良行教授に感謝します。また、実験装置制作のためご指導頂いた工作センターの長野和幸先生、器具をお貸しくださいましたものづくりセンターのスタッフの皆様、研究に協力して下さった研究室の皆様感謝し、謝辞を評します。